引用格式：廖晓勇，侯艺璇，李尤，等．我国大型复杂污染场地治理修复的挑战与对策．中国科学院院刊，2023, 38(12): 1874-1882, doi: 10.16418/j.issn.1000-3045.20231111001.
Liao X Y, Hou Y X, Li Y, et al. Challenges and countermeasures for treatment and remediation of contaminated mega-sites in China. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2023, 38(12): 1874-1882, doi: 10.16418/j.issn.1000-3045.20231111001. (in Chinese)

我国大型复杂污染场地治理修复的挑战与对策

廖晓勇* 侯艺璇 李 尤 王天翼

中国科学院地理科学与资源研究所 中国科学院陆地表层格局与模拟重点实验室 北京 100101

摘要 大型复杂污染场地的污染治理修复是国内外环境领域面临的重大难题。大型复杂污染场地具有影响范围广、污染物种类多、生态环境威胁大等特征，这类场地污染物的环境行为认知和高效治理修复都面临巨大挑战，其中土壤和地下水污染的形成机制、污染源的精准识别、智能决策优化等关键科技问题亟待解决。我国大型复杂污染场地在京津冀、长江经济带、珠江三角洲等经济发达地区呈集群式分布，涉及化学品制造业、石油等燃料加工业、黑色金属冶炼等行业。基于我国国情，文章提出了大型复杂污染场地修复治理的关键“三步曲”（TSRTCM），从调查评估与科学认知、方案决策与技术筛选、工程实施与监测评价3方面着力破解修复治理难题。大型复杂污染场地环境修复能有力支撑污染防治攻坚战，有助于区域经济社会绿色发展。

关键词 大型复杂污染场地，土壤污染，环境修复，形成机制，决策

DOI 10.16418/j.issn.1000-3045.20231111001

CSTR 32128.14.CASbulletin.20231111001

随着全球工业的快速发展及产业格局的演变，世界各地产生了大量的工业污染场地。据统计，全球有超过500万个污染场地[1]。这些污染场地不仅威胁着区域生态安全及人体健康，还需要消耗大量的人力、物力和财力对其进行污染管控和治理修复。

与普通规模的污染场地相比，大型复杂污染场地

*通信作者
资助项目：中国科学院战略性先导科技专项（A类）（XDA23010402），国家自然科学基金（42225707、42377463、42130713）
修改稿收到日期：2023年12月6日

的环境影响范围更广、社会关注度更高、环境可持续风险更大，已逐渐成为我国重大问题的新焦点[2]。党的十八大以来，党和政府高度重视工业污染场地的管控与修复。2018年5月，习近平总书记在全国生态环境保护大会上强调："要全面落实土壤污染防治行动计划，推动制定和实施土壤污染防治法。突出重点区域、行业和污染物，强化土壤污染管控和修复，有效防范风险，让老百姓吃得放心、住得安心"。2021年，我国环境污染治理投资总额达9 491.8亿元，占国内生产总值（GDP）的0.8%，占全社会固定资产投资总额的1.7%[3]。

大型复杂污染场地具有占地面积大、污染状况复杂、治理难度大等特征，这对场地治理修复的常用理论方法与技术装备都带来较大挑战。基于此，本文提出了大型复杂污染场地的基本概念，总结分析了这类场地的分布特征，阐述了管控修复中的关键科技问题，初步提出了对策与建议，以期为我国大型复杂污染场地管控与修复的学科发展及政府决策提供借鉴。

1 大型复杂污染场地的基本概念

1.1 大型复杂污染场地的历史沿革

国际上对大型复杂污染场地的关注最早可追溯到19世纪末，由于工业迅速发展及对环境保护的忽视，造成许多环境污染事件发生，并遗留了大量工业污染场地，如德国鲁尔区、荷兰鹿特丹港、美国多诺拉镇等[4]。20世纪70年代，美国拉夫运河毒地事件的爆发，促使美国于1980年通过了《环境应对、赔偿和责任综合法》，该法案因其中的环保超级基金（Super Found）而闻名，通常又被称为《超级基金法》。该法案为美国政府提供了针对环境污染事故的紧急应对和修复的专项资金，成为国际上首个针对污染场地治理的立法。进入21世纪后，国际上对大型复杂污染场地的认识不断提高，各国政府和国际组织逐渐重视大型复杂污染场地的治理修复工作。目前，关于大型复杂污染场地的界定，部分国家和地区发布了相关文件，但至今仍无统一定义。美国环境保护署在21世纪初开始制定关于大型复杂污染场地的政策，并将其定义为"任何危险废物场所，其调查和清理的总成本（不包括长期护理）等于或超过5 000万美元"。欧洲污染场地网络（NICOLE）于2003年提出了"大型污染场地"的概念，但未提出明确定义[5]。2004年，欧盟针对大型复杂污染场地提出了WELCOME（water, environment and landscape management at contaminated mega-sites）综合管理策略，以预防和降低大型复杂污染场地的风险。我国生态环境部在发布的标准《污染场地术语》（HJ 682—2014）定义了污染场地的概念，但对于大型复杂污染场地未进一步明确定义。

1.2 大型复杂污染场地的定义和特征

基于对国内外相关文献资料总结和科学调研，本文提出了大型复杂污染场地的定义：具有较大占地面积（50万平方米以上）、多个污染源、多种污染物的工业污染场地。这些场地污染是由工业活动、事故或废弃物处理等引起的，包括大型工厂、工业聚集区、军事场地、港口等类型。

大型复杂污染场地的主要特征如下[6]：① 场地规模大。占地面积50万平方米以上，且与周围环境有明确分界。由于国内外对大型复杂污染场地的占地面积暂无明确定义，本研究综合考虑污染规模、环境风险、处理应对的复杂程度、修复成本等多方面因素，将占地面积50万平方米以上归为大型复杂污染场地。② 具有独立污染源。场地内部有独立、多个污染源，且污染物类型多样、分布状况复杂、空间变异性强。③ 环境风险大。大型复杂污染场地是区域地下水、地表水和沉积物的长期潜在来源，对周边地区造成较大的生态和人体健康风险，但巨大的地块能转化为多种土地利用类型，具有较大转化和潜在利用价值。④ 治理难度大。修复治理投资巨大、周期长，需考虑多种介质、更大范围及更多利益相关方。

2 我国大型复杂污染场地的分异特征

我国大型复杂污染场地分布范围广，在京津冀、长江经济带、珠江三角洲等经济发达地区呈集群式分布（图1a）。总体呈现东部多于西部的趋势，南方与北方的数量大致相等。我国典型地理区域的大型复杂污染场地数量占比为：华东地区（28.15%）、华北地区（12.13%）、华中地区（11.66%）、西南地区（10.42%）、西北地区（7.15%）、东北地区（6.38%）和华南地区（5.44%）（图1b）。山东省的大型复杂污染场地数量最多（95个），其次为河北省（45个）和广东省（42个）。海南省和青海省内大型复杂污染场地数量很少，西藏自治区无大型复杂污染场地。

大型复杂污染场地以制造业为主。主要行业类型为：化学原料和化学制品制造业（23.14%）、石油、煤炭及其他燃料加工业（14.34%）、黑色金属冶炼和压延加工业（10.33%）、汽车制造业（4.21%）（图1c），其主要分布在华东、华北和华中地区（图1b）。化工、石油、钢铁等重工业具有资源消耗高、污染排放量大的特点，复杂的工艺流程要求布设多个大型生产设施，导致大规模占地面积和更严重的污染状况。

经济发展和自然资源是大型复杂污染场地空间分异的主要驱动力。经济发达地区通常具备大型工厂布局和建设的基础，即完善的产业布局、较大的人口密度和发达的工艺技术[7]。同时，自然资源是化工、矿产、冶炼等资源型企业选址的重要因素。例如，石油和煤炭加工业主要分布在山东、河北、内蒙古、陕西等石油和煤炭资源丰富的地区。

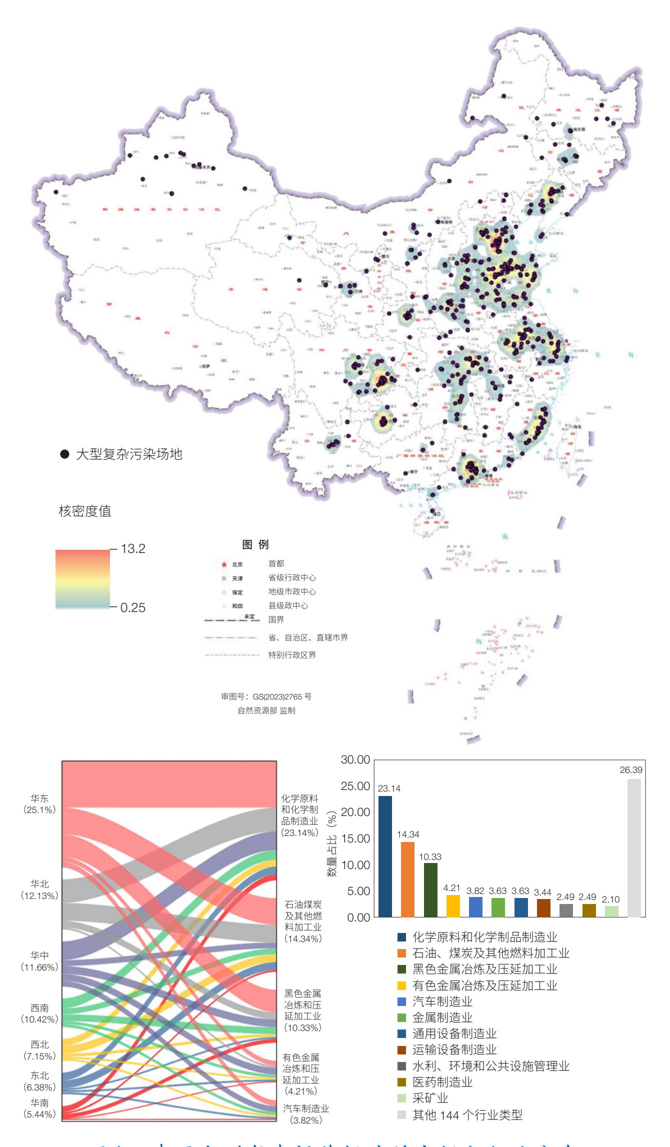


图1　我国大型复杂污染场地的空间与行业分布

Figure 1　Spatial and industrial distribution of contaminated mega-sites in China

（a）我国大型复杂污染场地空间分布；（b）我国地理分区与行业的数量关联；（c）我国大型复杂污染场地主要行业类型的数量占比

(a) Spatial distribution of contaminated mega-sites in China; (b) Quantitative correlation between geographical regions and industries; (c) Proportion of major industry types of contaminated mega-sites in China

3 我国大型复杂污染场地管控修复面临的关键科技问题

3.1 大型复杂污染场地中污染源的精准识别

大型复杂污染场地作为一个复杂地理系统，包含土壤、地下水、工业活动等多种要素，具有综合性、复杂性、耦合性、非线性、非平稳性等特点。污染物在各环境要素之间的行为相互联系、密不可分，这为污染源的精准识别和精细刻画带来挑战[10]。国内外学者在场地复合污染来源解析及刻画的研究中，多以受

体模型、扩散模型、同位素示踪等作为主要研究手段。然而，这种由点及面的污染源识别结果不确定性较大，已经不能满足日益增长的精细化环境管理需求，与未来场地环境管理的精准化、实时化、智能化需求仍存在较大差距[11]。

大型复杂污染场地具有“多污染来源、多介质共存、多时空演化”特点，对场地复合污染精准源解析技术提出了极高的要求。现有研究还应重点关注3个科学问题。① 如何建立污染源与土壤污染物之间的“源-汇”定量关系，解耦多污染来源叠加，实现复合污染的精准溯源。② 如何厘清场地多要素与污染分布的关联关系，解析多要素的交互耦合影响，揭示大型复杂污染场地中污染分布的形成机制。③ 如何针对现有场地污染溯源技术不足，速度和精度无法满足移动监管需求的现状，耦合多种溯源技术，构建高精度复合污染溯源体系，提高溯源精度和智能诊断水平。

3.2 大型复杂污染场地中污染物的时空分异规律

相比于小型污染场地，大型复杂污染场地的污染空间异质性强，对污染物运移扩散精准防控难度更高。污染格局分析的准确性将影响后续的风险诊断、修复决策和工程实施[8]。因此，有必要顾及土壤污染物空间分布的“强异质性”“非平稳性”特征，在“稀疏偏性”土壤钻井样点条件下，提高污染刻画精度，科学认知污染的时空分异及演变规律。

由于大型复杂污染场地中的土壤污染分布具有强异质性和非平稳性等特征，基于离散钻井样点和统计推断模型的污染空间刻画具有较大的不确定性[9]。具体来说，仍需关注4个科技问题。① 如何克服土壤钻孔数据的“稀疏偏性”，权衡昂贵的土壤钻孔调查成本与刻画准确度，科学布设采样点，实现成本效益最大化。② 如何基于有限钻孔数据，克服传统地统计学方法的平稳假设局限和过渡平滑的局限，精准刻画出场地中土壤-地下水多介质污染物空间分布。③ 如何结合大型复杂污染场地生产功能特点和水文地质特征，科学认知大型复杂污染场地中复合污染的空间分异格局。④ 如何利用迁移数值模型、空间统计模型、人工智能模型等，模拟污染物的时空演变规律，实现污染空间变化的预测预警。

3.3 大型复杂污染场地的区域生态环境风险诊断

场地污染风险评估的准确性决定了修复范围、治理成本和潜在风险。在污染场地开展修复治理前，需要进行人体健康风险评估，以量化场地污染风险，确定修复目标值及修复范围[12]。与普通规模的污染场地相比，大型复杂污染场地风险评估的重要性更为突出。首先，大型复杂污染场地通常涉及更广泛的区域和更多的受影响方；其次，大型复杂污染场地可能存在更多种类、更高浓度和更长时间的污染物暴露[13]。因此，需全面准确的评估生态环境风险，以采取相应的风险管控措施。

20世纪80年代以来，欧美发达国家先后建立了适用于本国的场地环境风险评估方法和体系，并将风险管理理念应用于场地的修复治理[14]。我国发布的《建设用地土壤污染风险评估技术导则》（HJ 25.3-2019）及相关研究大多借鉴了国外较为成熟的方法模型[15,16]。近年来，部分研究意识到直接套用已有模型和参数对风险评估结果可信度的影响，在概念模型分析、评估模型对比、评估参数修正等方面进行了探索和研究[16,17]。

大型复杂污染场地内可能涉及多种生产功能类型和规划用地类型，因此，其风险评估还应考虑以下3个科学问题。① 如何评估大型复杂污染场地及其周边区域不同功能区、不同深度之间的污染累积风险，构建科学的评估模型和方法。② 如何考虑大型复杂污染场地风险评估参数的时空变异性和非平稳性，获取精细化的风险评估参数。③ 如何考虑污染物在不同介质中的迁移转换规律、暴露途径和影响因素，准确评估环境风险的影响程度和范围，实现对环境风险的科学认知。

3.4 大型复杂污染场地环境管控与修复治理的决策优化

大型复杂污染场地的治理修复是一项复杂、耗资、耗时的艰巨工程，科学制定风险管控和治理修复策略，能够最大限度地节约资源成本。场地修复决策经历了早期重视成本、重视可行性、重视风险3个阶段后，逐渐关注更多的因素，如技术性能、环境影响、土地规划、经济效益等，这使决策过程存在较大的不确定性[18]。因此，有必要在场地修复过程中引入决策支持工具，帮助决策者明确目标和权衡利益，提高处理问题的能力和范围，优化资源配置和管理策略。

1971年，国外学者首次提出"决策支持系统"的概念[19]。目前国际上应用广泛的修复决策系统包括美国的SMARTe、欧盟的REC和WELCOME、意大利的DESYRE等。修复决策系统根据框架构建方式可分为3类：① 按照场地调查评估和管理的步骤构建；② 按照数学建模的思想和方法构建；③ 针对某特定场地问题构建[20]。

与普通规模的场地相比，大型复杂污染场地的修复决策优化研究还需考虑大数据处理、多决策目标、不确定性管理、长期维持性、规模效应等问题。具体包括4个科学问题。① 如何挖掘大型复杂污染场地中的多源大数据，并以可视化和交互的方式呈现，以支撑场地修复决策。② 如何解决大型复杂污染场地中的多决策目标、多利益相关者的权衡和优化问题，寻求最佳决策方案。③ 如何满足大型复杂污染场地内部不同分区的修复需求和限制，制定适应性策略。④ 如何顾及大型复杂污染场地管理修复过程中的规模效应，实现资源的优化调配。

4 我国大型复杂污染场地治理修复的思路与对策

在全球范围内，大型复杂污染场地的修复治理一直是一项极具挑战性的任务。欧美发达国家在长期的实践中积累了丰富的经验和先进的技术，为我国大型复杂污染场地的治理修复提供了宝贵启示。通过借鉴欧美发达国家的实践经验，结合我国国情提出以下针对性的对策与建议。

4.1 大型复杂污染场地修复治理的关键"三步曲"

大型复杂污染场地应重点关注污染精细刻画与边界划定、基于风险的综合管理策略、修复工程实施与后期监管等方面。本研究提出适用于我国的大型复杂污染场地修复治理的关键"三步曲"（TSRTCM）。第一步，以大数据、多要素、多模型为原则开展调查评估与科学认知。综合运用场地多源大数据、场地多要素信息和多种方法模型，深入挖掘大型复杂污染场地数据信息，科学认知污染来源、迁移途径、分异特征、环境风险和扩散趋势，以支撑后续的修复策略及工程实施。第二步，以分区域、分时段、分类型为原则开展方案决策与技术筛选。基于对大型复杂污染场地的科学认知，耦合空间、时间、污染类型3个维度，实施分区、分时、分类治理，利用人工智能、大数据分析和模拟预测等技术手段，构建智能化决策支持系统，制定定性、定时、定位、定量的多维度综合修复治理策略。第三步，以全方位、全过程、全周期为原则开展工程实施与监测评价。通过建立土壤、地下水、大气等多介质的全方位立体化的监测手段，对修复工程实施的全过程进行动态监测和跟踪评估，保障全周期的修复效果和绿色可持续性。

4.2 调查评估与科学认知——大数据、多要素、多模型

以大数据、多要素、多模型为原则开展大型复杂污染场地中污染特征和风险的调查评估与科学认知。① 针对大型复杂污染场地中要素众多、数据量大的特点，围绕场地多源大数据，综合遥感技术、采样调查、环境监测、历史记录等多种数据源，建立统一的数据管理与可视化平台，推动数据整合和标准化，实

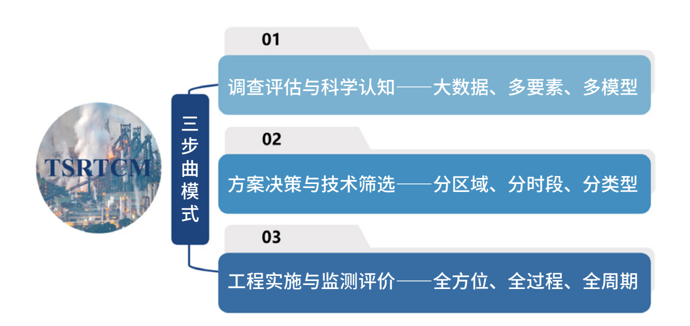


图2　大型复杂污染场地治理修复治理的关键“三步曲”
Figure 2　Three steps for remediation and treatment of contaminated mega-sites

现对大型复杂污染场地数据的综合管理和便捷查询。②基于生产活动、水文地质、污染浓度、敏感受体等场地内外部多要素信息，发掘大型复杂污染场地污染分布模式、扩散趋势、关联关系，科学认知污染来源、迁移途径、分异特征和风险预警。③综合运用人工智能方法、空间统计模型、污染物迁移数值模型、多元统计模型等多种模型方法，定量评估污染物的扩散、迁移路径和分布特征，预测潜在的环境影响，为后续管控和修复决策提供科学依据。

4.3 方案决策与技术筛选——分区域、分时段、分类型

*以分区域、分时段、分类型为原则开展大型复杂污染场地的修复方案决策与技术筛选。*①针对大型复杂污染场地中污染分布空间异质性强的特点，在空间上采用“分区治理”的修复策略，制定差异化修复方案，尽快释放无污染区和低风险区投入重新开发利用，将更多的修复资金投入到高风险区，促进修复资源的优化合理分配。②大型复杂污染场地修复治理具有长期性的特点，在时间上采用“分时治理”的策略，在制定修复方案时综合考虑污染物在介质中的迁移扩散和自然衰减等机制机理，防止划定修复范围与实际污染状况之间的偏差，在污染风险可控的前提下合理利用自然衰减等低成本措施，促进环境和经济效益最大化。③大型复杂污染场地中污染物类型多样，应根据污染物的理化特征与污染程度，结合物理、生物、化学多修复技术手段，合理制定修复技术组合，实现修复效果最大化和绿色低碳化。④耦合空间、时间、污染类型3个维度，利用人工智能、大数据分析、模拟预测等技术手段，构建智能化决策支持系统，制定定性、定时、定位、定量的多维度综合修复治理策略。

4.4 工程实施与监测评价——全方位、全过程、全周期

*以全方位、全过程、全周期为原则开展大型复杂污染场地的修复工程实施与监测评价。*①针对大型复杂污染场地占地面积大、污染土体深的特点，建立全方位立体化的监测体系。针对场地中土壤、地下水、地表水、大气等多环境介质，依托在线监测、定点取样分析和现场监测等多手段，加强施工过程规范化和精细化管理，确保修复工程实施过程的可控性和效果评估的可靠性。②对修复治理工程进行全过程监测，跟踪修复效果的持续性和环境风险的变化，及时发现问题和风险，基于现场工程实施进展，采取“动态修复”的方式对修复方案进行调整和改进。③追踪开展修复后土地的可持续管理，建立长期监测方案和回顾机制，防范二次污染和污染反弹等问题，恢复修复后土壤的生产和生态功能，实现土地永续利用。④保障修复过程全生命周期的绿色低碳和可持续性，优先应用高能效装备产品和低碳修复材料，重视工程实施中的土壤保护、绿色回收处理、可重新利用性、施工安全性，减少对土壤环境的二次破坏，降低环境负荷，提高资源循环利用。

5 结语

大型复杂污染场地的管控与修复工作是我国经济社会发展过程中面临的重大环境挑战之一，关系着经济建设、城市发展、环境安全。当前，我国高度重视土壤污染防治、生态文明建设、美丽中国建设等重要领域，这是我国自身发展的需要，也是对全球发展倡

议的积极响应，大型复杂污染场地的管控与修复在这些领域中发挥着关键作用。我国应建立针对大型复杂污染场地的修复治理模式，以调查评估与科学认知、方案决策与技术筛选、工程实施与监测评价为着力点，推动大型复杂污染场地治理修复精准化、信息化、智能化，为解决土壤和地下水污染的重大资源环境问题、全面建设美丽中国奠定良好的科学支撑和实践基础，助力我国经济社会绿色发展和生态文明建设。

参考文献

1 Hou D Y, Al-Tabbaa A, O'Connor D, et al. Sustainable remediation and redevelopment of brownfield sites. Nature Reviews Earth & Environment, 2023, 4: 271-286.

2 Song Y N, Hou D Y, Zhang J L, et al. Environmental and socio-economic sustainability appraisal of contaminated land remediation strategies: A case study at a mega-site in China. Science of the Total Environment, 2018, 610-611: 391-401.

3 中华人民共和国生态环境部. 2021 年中国生态环境统计年报. (2023-01-18)[2023-11-30]. https://www.mee.gov.cn/hjzl/sthjzk/sthjtjnb/202301/t20230118_1013682.shtml.
Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. 2021 China ecological environment statistical annual report. (2023-01-18) [2023-11-30]. https://www. mee. gov. cn/hjzl/sthjzk/sthjtjnb/202301/t20230118_1013682.shtml.(in Chinese)

4 Jacobs E T, Burgess J L, Abbott M B. The donora smog revisited: 70 years after the event that inspired the clean air act. American Journal of Public Health, 2018, 108(S2): S85-S88.

5 Bardos P R. Sharing experiences in the management of megasites: Towards a sustainable approach in land management of industrially contaminated areas// Final Report of the NICOLE Worshop. Lille: NICOLE, 2004: 29-31.

6 廖晓勇. 全球污染场地修复技术与应用. 北京: 科学出版社, 2022.
Liao X Y. Global Contaminated Site Remediation Technology and Application. Beijing: Science Press, 2022. (in Chinese)

7 Song Y N, Hou D Y, Zhang J L, et al. Environmental and socio-economic sustainability appraisal of contaminated land remediation strategies: A case study at a mega-site in China. Science of the Total Environment, 2018, 610-611: 391-401.

8 Tao H, Liao X Y, Cao H Y, et al. Three-dimensional delineation of soil pollutants at contaminated sites: Progress and prospects. Journal of Geographical Sciences, 2022, 32: 1615-1634.

9 陶欢, 廖晓勇, 曹红英, 等. 场地土壤污染物含量三维刻画的研究进展. 地理学报, 2022, 77(3): 559-573.
Tao H, Liao X Y, Cao H Y, et al. Research progress of three-dimensional delineation of soil pollutants at contaminated sites. Acta Geographica Sinica, 2022, 77(3): 559-573. (in Chinese)

10 Ma Y, Li Y, Fang T T, et al. Analysis of driving factors of spatial distribution of heavy metals in soil of non-ferrous metal smelting sites: Screening the geodetector calculation results combined with correlation analysis. Journal of Hazardous Materials, 2023, 445: 130614.

11 Zeng J Q, Ke W S, Deng M, et al. A practical method for identifying key factors in the distribution and formation of heavy metal pollution at a smelting site. Journal of Environmental Sciences, 2023, 127: 552-563.

12 Liao X Y, Liu Q Z, Li Y, et al. Removal of polycyclic aromatic hydrocarbons from different soil fractions by persulfate oxidation. Journal of Environmental Sciences, 2019, 78: 239-246.

13 Chen Y Z, Lu H W, Li J, et al. A leader-follower-interactive method for regional water resources management with considering multiple water demands and eco-environmental constraints. Journal of Hydrology, 2017, 548: 121-134.

14 史俊祥, 郑娟, 杨洋, 等. 基于HERA土壤分层风险评估的SVE修复方案优化. 环境工程学报, 2019, 13 (12): 2954-2962.
Shi J X, Zheng J, Yang Y, et al. Optimization of SVE remediation project based on soil layer risk assessment with HERA model. Chinese Journal of Environmental

Engineering, 2019, 13(12): 2954-2962. (in Chinese)

15 赵丹, 於方, 廖晓勇, 等. 发达国家(地区)污染场地修复现状及对中国的启示. 中国科学院大学学报, 2023, 40(4): 441-452.

Zhao D, Yu F, Liao X Y, et al. Status of remediation for contaminated sites in developed countries and regions and its enlightenment to China. Journal of University of Chinese Academy of Sciences, 2023, 40(4): 441-452. (in Chinese)

16 张丽娜, 姜林, 钟茂生, 等. 基于用地规划的大型污染场地健康风险评估. 环境科学研究, 2015, 28(5): 788-795.

Zhang L N, Jiang L, Zhong M S, et al. Risk assessment based on planning scenarios for a large-scale contaminated site. Research of Environmental Sciences, 2015, 28(5): 788-795. (in Chinese)

17 邓一荣, 刘丽丽, 李韦钰, 等. 基于健康风险评估的棕地再开发利用控规优化研究. 生态经济, 2019, 35(8): 223-229.

Deng Y R, Liu L L, Li W Y, et al. Optimization for regulatory detailed planning of brownfield redevelopment based on human health risk assessment. Ecological Economy, 2019, 35(8): 223-229. (in Chinese)

18 Schirmer M, Lyon K, Armstrong J E, et al. A socio-ecological adaptive approach to contaminated mega-site management: From ‘control and correct’ to ‘coping with change’. Journal of Contaminant Hydrology, 2012, 127(1-4): 101-109.

19 Morton S. Management Decision Systems: Computer-Based Support for Decision Making. Boston: Havard University Press, 1971.

20 廖晓勇, 陶欢, 阎秀兰, 等. 污染场地修复决策支持系统的几个关键问题探讨. 环境科学, 2014, 35(4): 1576-1585.

Liao X Y, Tao H, Yan X L, et al. Discussion on several key points of decision support system for remediation of contaminated sites. Environmental Science, 2014, 35(4): 1576-1585. (in Chinese)

Challenges and countermeasures for treatment and remediation of contaminated mega-sites in China

LIAO Xiaoyong* HOU Yixuan LI You WANG Tianyi

（CAS Key Laboratory of Land Surface Pattern and Simulation, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China）

Abstract The treatment and remediation of pollution at contaminated mega-sites poses a significant challenge in the environmental science both domestically and internationally. Contaminated mega-sites are characterized by their widespread impact, multiple types of pollutants, and significant ecological and environmental threats. The environmental behavior cognition and efficient remediation at contaminated mega-sites face enormous challenges, among which key technological issues such as the formation mechanism of soil and groundwater pollution, accurate identification of pollution sources, and intelligent decision-making optimization urgently need to be solved. In China, contaminated mega-sites are concentrated in economically developed regions such as Beijing-Tianjin-Hebei, the Yangtze River Economic Belt, and the Pearl River Delta, and involve industries like chemical manufacturing, oil and other fuel processing industries, and ferrous metal smelting. Taking into account the national context, this study proposes a three step model for the remediation and treatment of contaminated mega-sites (TSRTCM), focusing on addressing the problems from three steps: investigation and scientific cognition, decision-making and screening techniques, and engineering implementation and monitoring evaluation. The environmental remediation of contaminated mega-sites can effectively support the battle against pollution prevention and contribute to the green development of regional economy and society.

Keywords contaminated mega-site, soil pollution, environmental remediation, formation mechanism, decision-making

廖晓勇 中国科学院地理科学与资源研究所研究员。主要研究领域为区域环境地理、土壤污染修复、退化耕地质量提升等。E-mail: liaoxy@igsnrr.ac.cn

LIAO Xiaoyong Professor of Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences (CAS). His research focuses on regional environmental geography, soil pollution remediation, and improving the quality of degraded farmland. E-mail: liaoxy@igsnrr.ac.cn

■责任编辑：张帆

*Corresponding author